水晶振動子の内部構造と製造方法

表面実装型水晶振動子内部構造と従来品(リード型)との比較

草野　淳

水晶振動子は，ほかの電子部品と同様に長い間リード線タイプのスルー・ホールによるはんだ付け実装が主流でした．しかし，ポケットベルに始まる携帯機器の需要が高まり，小型化・低背化への要求が強まり，セラミック・パッケージに封止した表面実装型へと移行してきました．現在，生産数ではリード型を凌いでおり，今後も拡大基調となります．ここでは，その構造上の違いと製造方法について説明します．（筆者）

内部構造は意外とシンプル

● リード型水晶振動子の内部構造

水晶振動子はほかの電子部品と違って機械的なアクティブ素子であるために，トランジスタのように素子全体を樹脂などで固定することができません．少なくとも水晶チップの振動部分は，ほかの束縛を受けず自由に動ける空隙を構成させる必要があります．

図1にリード型振動子の内部構造を示します．図のように構造はいたってシンプルです．円形に加工された水晶チップ(φ4mm～φ15mm程度)上には，表裏両面にその外径の約半分程度の円形の金属膜(ニッケル・クロムなどの下地膜＋金・銀などの膜)が500Å～1000Å(1Åは1.0×10^{-10}m)程度の厚みで形成されています．これが厚みすべり振動に必要な電荷エネルギーを蓄積する励振電極となります．その電極から導通を取るための帯が電極形成と同じ材料で形成されています．

水晶チップは洋白(銅，亜鉛，ニッケルの合金)やステンレスなどでできた金属サポートのスリットにマウントされます．このサポートは厚さが100μm以下でバネ性を持たせており，サポートからの水晶チップに加わる熱応力や外部からリード線を介して伝わる機械的応力を極力抑えた設計になっています．

水晶チップとサポートはエポキシ(エポキシ基と呼ばれる反応基をもつ樹脂状物質)やポリイミド系の導電性接着剤(樹脂の母材に導電性を確保するための金属分を練り込んだもの)で保持されており，同時に電極からの帯とサポートとの導通を取っています．

金属ベースは鉄やコバール(鉄にニッケル，コバルトを配合した合金)などでできており，ガラス・ハーメチック・シールによりリード線引出し部の機密性を確保しています．サポートとリード線とは抵抗溶接によって接合されています．ケースは洋白やキュープロ・ニッケルなどでできており，金属ベースとは抵抗溶接によって封止されます．この容器内の雰囲気は窒素または真空となり，気密性はリーク・レート1×10^{-9}Pa・m^3/s以下に保たれています．

● リード型振動子は衝撃に弱い

リード型振動子はその構造上，**図1**の矢印の方向には内部の水晶チップが動きやすく，そのために外部からの衝撃には弱くなります．衝撃による周波数の変化量が大きくなったり，場合によっては破壊に至ることもあります．

従って，落下などの衝撃でその方向が定まらないモバイル機器などに採用する場合は，その信頼性を十分に検証する必要があります．一般的に小型になればなるほど耐衝撃性は向上します．

KeyWord　アクティブ素子，リード型振動子，表面実装型，励振電極，ガラス・ハーメチック・シール，シリコン樹脂，ランバード加工工程，ワイヤ・ソー方式，エッチング工程

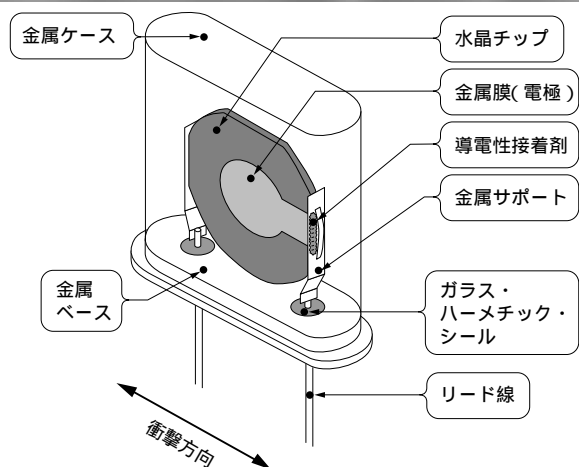



図1　リード型振動子の内部構造
構造はいたってシンプル．

図2　表面実装型振動子の内部構造
水晶チップは水平にマウントされている．

● 表面実装型SMD振動子の内部構造

図2に表面実装型振動子の内部構造を示します．リード型は水晶チップが縦にマウントされているのに対して，表面実装型は水平にマウントされています．最大の特徴は，水晶チップを導電性接着剤でダイレクトに保持していることです．従って，水晶チップへの外部からの応力緩和は，この導電性接着剤自身で行う必要があります．この点を考慮して，導電性接着剤は弾力性のあるシリコン樹脂を母材にしています．

水晶チップのマウントは**図2**の例では片持ち支持ですが，用途によっては両持ち支持にする場合もあります．一般的には，導電性接着剤からの応力の影響がもっとも少ない片持ち支持構造を採用します．

ベースはセラミック・パッケージです．導電性接着剤と裏面電極端子との電気的接続はセラミック・ラミネート間に印刷されたタングステン・メタライズ（主成分であるダングステンの粉末とガラス粉を溶剤で練ったものをスクリーン印刷した導通線）を配線することで確保しています．

リッドはコバールにニッケル・メッキしたもので，セラミック・パッケージに銀ろうにより付けられた同じコバールのリングとシーム溶接されます．気密性はリード型振動子と同等です．

●耐衝撃性は表面実装型の方が有利

表面実装型振動子は，比較的柔らかいゴム性を持つシリコン系接着剤を採用しているため，耐衝撃性はリード型に比べて非常に優れています．耐衝撃性の要求は携帯電話に代表されるモバイル機器が一番厳しく，一般的な信頼性試験方法は「180cmの高さから150gの負荷状態での*X*，*Y*，*Z* 3方向の自然落下」です．

試験後の周波数ずれの規格にもよりますが，テスト回数が10回程度であればなんら問題はありません．

製造工程はかなり複雑

● 特性の要である水晶チップはこうして作られる

ATカット水晶振動子は，水晶チップの厚みが周波数を決定します．従って，目的の周波数を作り込むためには厚みの加工精度を上げる必要があります．**図3**に水晶チップの製造工程フローを示します．

以下，順を追って説明します．

1）ランバード加工工程

人工水晶原石を後工程で使いやすいサイズの棒状に切り出します．この加工されたものをランバードと呼んでいます．切り出しには主にダイヤモンド研削盤を使用します．

2）ウェハ加工工程

温度特性の要求にあったランバードの切断角度を，X線により結晶軸から正確に測角し，その角度に沿って半導体でもよく使われているワイヤ・ソー方式[注1]でウェハ状に切り出します．この段階での加工厚み精度は数十μm程度で，まだ目的の厚みよりも数十μm厚めになります．

3）粗ラッピング工程

ラッピング工法により後工程で使いやすいように所定の厚みに仕上げます．ラッピング工法とは，上下の平面度の

注1：ワイヤ・ソー方式とは，ピアノ線状のワイヤを多数張り，炭化珪素（SiC）を主成分とした研磨材と専用オイル混合液を滴下させながら往復運動させることにより切断する工法．

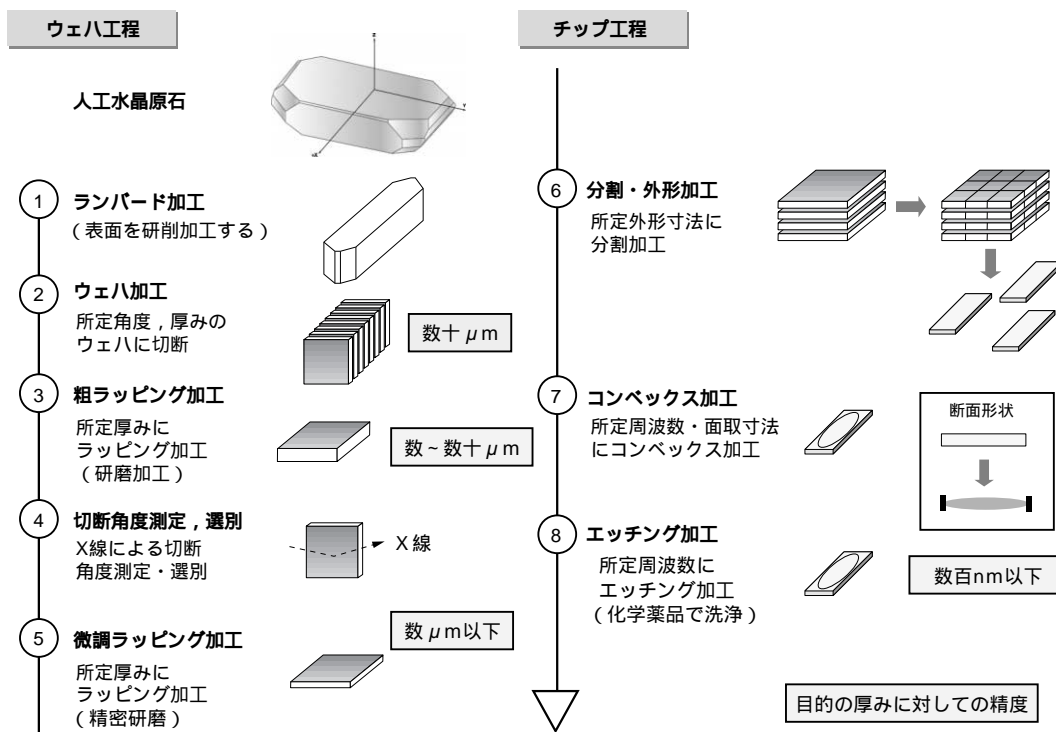



図3　水晶チップの製造工程フロー
人工水晶から切断→ウェハ研磨→チップ分割→エッチングの一連のフローを示している．数値は目的の厚み（周波数）に対しての厚み精度を表している．各工程で徐々に目的の厚みに近付いていく．

よい鋳鉄の円盤（ラップ定盤と言う）の間にウェハを入れ，それらの間に**2)**と同じ研磨材を加えて，お互いに相互回転運動をさせてウェハの表裏を研磨する工法です．

この段階での加工厚み精度は数～数十μｍ程度となり，目的の厚みよりも数～数十μｍ厚めになります．

4）切断角度測定・選別工程

X線による切断角度の分類および選別をします．工業レベルでは15秒～30秒程度の分類をするのが一般的です．1秒とは約6km先の170cmの身長の人が地面と成す角度に匹敵するほどの微小角度です［60分法で1°(度)＝60′(分)＝60″(秒)］．

この工程は第2章でも説明した振動子の温度特性に直接影響するので，重要な工程となります．

5）微調ラッピング工程

目的の周波数に近づけるために**3)**の工程と同様なラッピングを行います．研磨剤には酸化アルミニウムを使用します．この段階での厚み精度は数μｍ前後となり，目的の厚みよりも数μｍ前後厚めになります．

6）分割・外形加工工程

最適な設計値に基づく外形寸法加工をします．**5)**のウェハを多数枚貼り合わせて主にワイヤ・ソー方式で切断し，外形をラッピングによって目的のサイズに仕上げていきます．外形加工寸法精度は±数μｍ以下が要求されます．これは，不要振動モードとの結合によって周波数温度特性がひずんだり不連続となる要因が外形寸法に依存することによります．

7）コンベックス加工工程

特に低い周波数によっては凸レンズ状のコンベックス加工が必要となります．コンベックス加工とは，鋼鉄製の円筒パイプに**6)**のチップと炭化珪素の研磨材を入れて回転させ，パイプ内壁の曲率の形状に研磨する工法です．

周波数が低くなると水晶チップの厚みが増し振動しずらくなるため，どうしてもCI（crystal impedance）値が上昇してしまいます．コンベックス加工は，この上昇をできるだけ抑えるためにチップ中央の電荷密度を高め，振動の効率を上げる効果（エネルギー閉じ込め効果）があります．

8）エッチング工程

水晶チップとしての最終的な厚み精度の追い込みは，フッ化水素アンモニウム液を用いたケミカル・エッチングで行います．この工程で目的の厚みに仕上げますが，厚み

QMEMSのジャイロ・センサへの応用

● ジャイロ・センサとは

運動を検出するセンサの一つにジャイロ・センサがあります．1秒間あたりの角度の変化量を角速度といい，ジャイロセンサは角速度を検出するデバイスです（**図A**）．

● ジャイロ・センサの主な用途

ジャイロ・センサの代表的な用途として，デジタル・カメラの手ぶれ防止があります．

ジャイロ・センサはデジタル・カメラの手ぶれ防止機能において，どのくらい「ぶれたのか」を検出しています．手ぶれとはカメラを持つ人間の関節を中心とした回転運動です．この回転運動の角速度を検出し，逆方向に光学系やCCD（charge coupled device）を瞬時に動かすことで，手ぶれによる画像のぶれを防止します（**図B**，**写真A**）．

● ジャイロ・センサの原理

振動ジャイロセンサの原理を紹介します．

1）駆動モード時，駆動アームが常に振動している（**図C**）

2）本体が回転する（**図D**）

3）回転が加わることで，駆動アームにコリオリの力が働き垂直方向の振動が発生する（**図E**）

コリオリの力とは等速で運動している物体に回転という運動が加わると，両方の運動に垂直な方向に運動量に比例する（見かけ上の）力が生まれること．

(4）駆動アームの垂直方向の振動により，固定部が屈曲．検出アームに検出振動が発生する（**図F**）

● 最新の小型ジャイロセンサ

音さ型水晶振動子のチップ構造を応用しQMEMSフォトリソ加工技術を活用し，2mm × 2mmの素子を実現しました．音さ型水晶振動子と同様，溝構造をフォトリソで加工することにより，小型でありながら高感度なジャイロ・センサとなっています（**写真B**）．

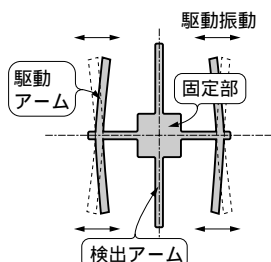
＜宮澤輝久＞

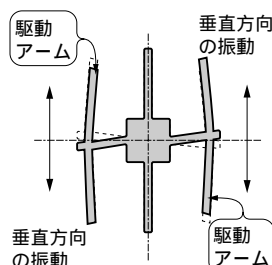
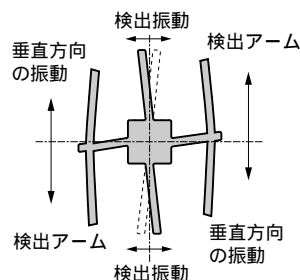
図A　角速度とは1秒間あたりの角度の変化量

図B
人間の手ぶれ．各関節で回転運動が生じる

写真A　手ぶれをした画像と手ぶれ補正をした画像

写真B　QMEMSのジャイロ・センサ

エプソントヨコムのXV-3500CB．外形寸法は5mm × 3.2mm

図C　駆動モード時，駆動アームが常に振動している

図D　本体が回転する

図E　回転が加わることで，駆動アームがコリオリの力 が働き垂直方向の振動が発生する

図F　駆動アームの垂直方向の振動により，固定部が屈曲．検出アームに検出振動が発生する

精度は±数百nm以下となり，相当の高精度になります．

しかしながら，この厚み精度を周波数で表すと，振動子素子としての目的の周波数にはほど遠く，数十kHz程度の開きがあります．この開きをppmのオーダまで近づける工程が，次に説明する振動子組み立て工程です．

● ppmオーダの周波数作り込み

図4に振動子の組み立て製造工程フローを示します．

1）電極形成工程

電極の形状にエッチングされた上下のメタル・マスクに水晶チップを挟み込み，スパッタ法（または真空蒸着法）に

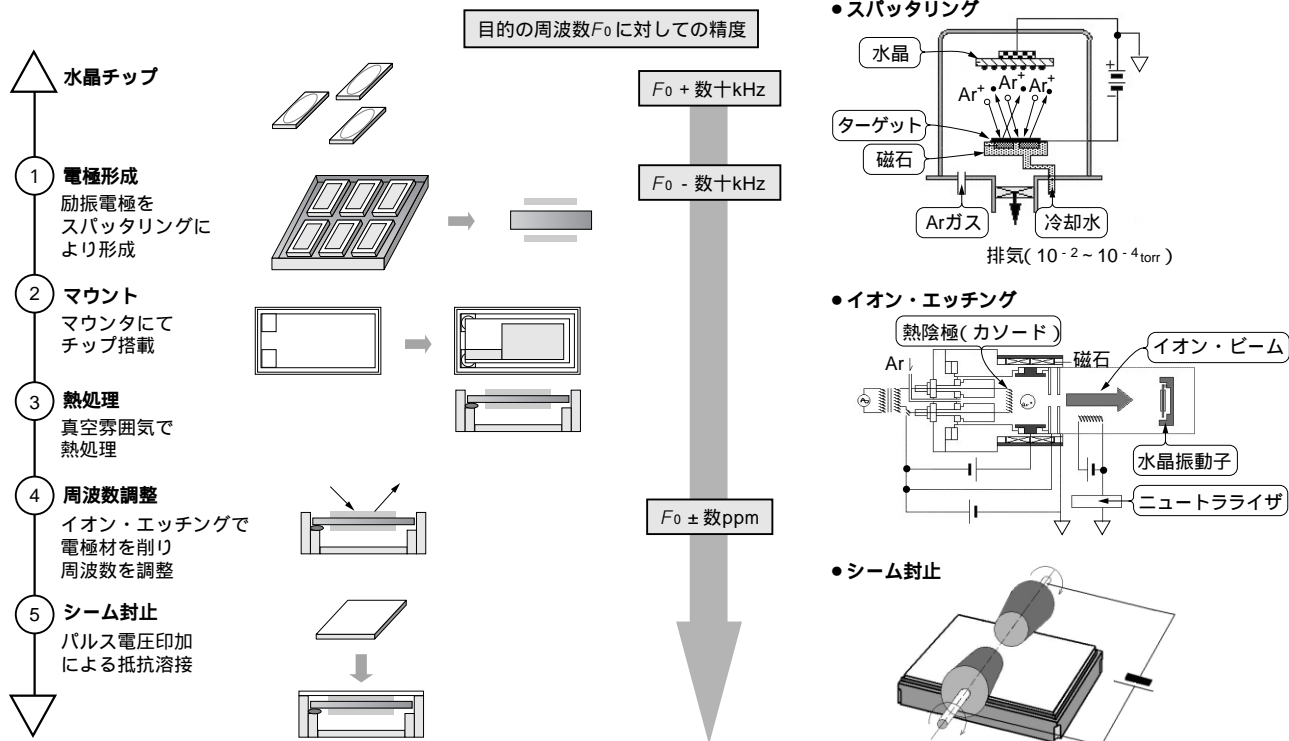



図4　振動子組み立ての製造工程フロー

水晶チップをセラミック・パッケージに組み込んで蓋をするまでを示している．電極膜形成はスパッタで行い，周波数の最終調整はアルゴン・イオンを衝突させ電極膜をエッチングする工法．封止はローラ電極にパルス電圧を印加して蓋（リッド）をシーム状に溶接して行くシーム溶接工法．

より電極材料をパターニングします．

AT振動子は水晶チップの厚み相当分の質量変化でも周波数が変化します．この場合，電極のパターニングで質量が付加されるので，その分，周波数は低下します．

2）マウント工程

セラミック・パケージの水晶チップ搭載部に導電性接着剤を塗布し，その上から水晶チップをマウントします．その後乾燥炉に入れて接着剤の乾燥をします．

3）熱処理工程

周波数を安定させるために，接着剤のアウト・ガスを兼ねて高温で熱処理をします．

4）周波数調整工程

電極材料を削り取ることにより電極の質量が減り，周波数は上昇します．反対に，電極に再度電極材料を付加させれば周波数は低下します．以前は真空蒸着により周波数を下げながら調整していましたが，近年は経済的効果や品質面で，電子イオンを衝突させ電極材料を削り取り周波数を上げながら調整する工法が主流となりました．この調整工程で数十kHzあった目的の周波数との差をppmオーダまで追い込みます．

5）シーム封止工程

空気中の湿気の進入や酸化を防ぐために，リッドをシーム溶接します．シーム溶接とは，**図4**に示すようにローラ電極間に電流を流しジュール熱を発生させることによって回転させながら溶接する工法です．

＊　　＊　　＊

水晶振動子の製造工程は非常に複雑であり，人口水晶原石切断から封止までのリードタイムは数十日にも及びます．人口水晶原石の育成から数えると，なんと半年以上もかかる場合があります．従って，材料である水晶ウェハや水晶チップはある程度事前に準備しておくのが一般的です．

参考・引用*文献

(1) 日本水晶デバイス工業会技術委員会編；小型水晶振動子利用ガイド，1994年12月．
(2) 日本水晶デバイス工業会技術委員会編；水晶デバイスの解説と応用，1996年10月．

くさの・じゅん
エプソントヨコム（株）